

## **ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА САМОРАСКИПАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ВАННЫ**

### **Аннотация**

*Представленная работа направлена на создание анимационной интерактивной модели, имитирующей процесс самораскипания сталеплавильной ванны. Модель основана на сочетании подходов математического и имитационного моделирования и отражает динамику протекающих в ней физических процессов.*

*Ключевые слова: самоорганизация, модель, сталеплавильная ванна, самораскипание.*

### **Abstract**

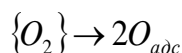
*This work aims to create animation interactive model, simulating the process of self-boiling in steelmaking bath. The model is based on a combination of approaches imitational and mathematical simulation and reflects the dynamics occurring physical processes.*

Процесс окисления растворенного в жидком железе углерода, сопровождающийся выделением газообразного продукта реакции и перемешиванием («кипением») ванны, является основой механизма протекания всех сталеплавильных и ряда других металлургических процессов. Математическому описанию этого процесса было посвящено достаточно много работ.

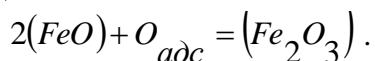
Рассмотрим модель гетерогенного процесса обезуглероживания сталеплавильной ванны в системе газ-шлак-металл, в которой учитываются положительные и отрицательные обратные связи, а также инерционность процессов. Первые из этих моделей были опубликованы еще в 1962 году, но в то время роль внутренних обратных связей и вытекающая отсюда возможность самораскипания ванны еще не была достаточно четко осмыслена. Это понимание пришло несколько позже. Также следует подчеркнуть, что возможность самораскипания ванны и некоторые гипотезы об этом механизме были высказаны ранее в работах М.Я. Меджибожского. Ниже рассмотрен несколько упрощенный вариант этих моделей, но, в то же время, имеющий структуру уравнений, весьма сходную с рассматриваемыми моделями.

Внутренний механизм процесса в упрощенном виде выглядит следующим образом:

Газообразный кислород адсорбируется на верхней поверхности шлака



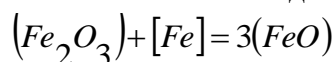
и в пограничном слое газ-шлак окисляет низшие оксиды железа до высших, например, по реакции:



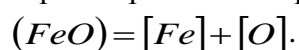
При этом происходит накопление окислительного потенциала в шлаке. Эта стадия представляет достаточно большое сопротивление для переноса кислорода в металл и, следовательно, сопровождается значительным градиентом концентраций.

Вторым источником поступления оксидов железа в шлак являются присадки железной руды или агломератов или интенсивная продувка кислородом с высоко поднятой фурмой. Поступление кислорода в металл за счет этого источника осуществляется с некоторым запаздыванием. В связи с этим при математическом описании шлак будем представлять в виде некоторого промежуточного резервуара с временной задержкой.

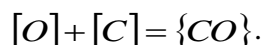
Внутри шлака происходит турбулентный перенос оксидов железа от верхней границы (шлак-газ) к нижней (шлак-металл), где при соприкосновении с металлом происходит восстановление высших оксидов до низших:



и далее растворение кислорода в металле (или его ионизация за счет контактов с металлом)



Растворенный в металле углерод на поверхности поднимающихся в слое металла пузырьков  $CO$  реагирует с растворенным в металле кислородом по реакции:



Именно эта гетерогенная реакция с положительной обратной связью от продукта реакции и является ведущей во всех сталеплавильных процессах. Данная реакция может протекать только на поверхности пузырьков  $CO$ , зародыши которых образуются на огнеупорной (шероховатой) поверхности подины или на плавающих на границе шлак-металл кусках руды.

Будем считать, что лимитирующей стадией в этом многостадийном процессе является доставка кислорода из газовой фазы и шлака в металл, к месту реакции (пузырькам), путем конвективной (турбулентной) диффузии. Для упрощения анализа выделяем только одно диффузионное звено, в котором рассматривается градиент концентраций от середины шлака до середины глубины ванны, и тогда скорость доставки кислорода (или скорость обезуглероживания) описывается уравнением следующего вида:

$$\frac{dX_c}{dt} = \beta_{III-M} \{ (FeO)_{III} - \alpha [O]_M \},$$

где  $\beta_{III-M}$  – эффективный коэффициент массопереноса, являющийся функцией скорости обезуглероживания из-за перемешивающего действия газообразного продукта реакции (5).

В целом механизм обезуглероживания в системе газ-шлак-металл с некоторыми допущениями представляется следующей системой уравнений, включая и приведенное выше.

$$\frac{dX_{FeO}}{dt} = d_0 U_{FeO} (t - \tau_0) + \alpha_1 f \{ v_c (t - \tau_n) \} P_{O_2} - d_2 \frac{dx_c}{2dt}. \quad (1)$$

$$V_c = \frac{dx_c}{dt} = \beta_{III-M} \{ (FeO) - \alpha_3 [O] \}. \quad (2)$$

$$[O] = \frac{mP_{CO} (h_{II})}{[C]}. \quad (3)$$

$$\beta_{III-M} = f \{ v_c (t - \tau) \}. \quad (4)$$

$$f(n_{II}, r_{II}) = \frac{0,224}{12} \frac{v_c M_M}{\bar{V}_{II} F_{нов}}. \quad (5)$$

$$\bar{V}_{II} = P(v_{II}) = m_{II} + \sqrt{D_{II}}. \quad (6)$$

Большинство принятых в этих уравнениях обозначений понятно из предыдущего текста. Приведем расшифровку остальных обозначений и некоторые пояснения.

Первый член уравнения (1) связан с начальным потенциалом оксидов железа в шлаке и периодическими присадками руды, а второй отражает приток кислорода из газовой фазы с учетом парциального давления кислорода в ней и фактора перемешивания верхних слоев шлака. Уравнение (3) получено на основе термодинамического равновесия реакции 1, где  $m = 1/k_c = 0,0025$  при  $P_{CO} = 1$  атм. Варьируя глубиной погружения пузыря  $h_n$ , можно имитировать влияние на процесс обезуглероживания расположением преимущественного фронта протекания реакции 1, а также получать одну из характерных частот осцилляций в этой системе. Другая группа частот осцилляций должна получаться из решения системы уравнений (1)–(4), в которых отражены две положительные и две отрицательные обратные связи, а также приход оксидов железа и их расходование на реакцию обезуглероживания (2) и на накопление кислорода в металле и шлаке  $\alpha_3[O]$ .

Уравнение (5) представляет функцию размера и количества пузырей, отнесенных к единице площади поверхности ванны  $F_{нов}$  с учетом массы металла  $M_M$ , а уравнение (6) отражает вероятностный характер образования пузырьков в виде функции распределения усредненного объема  $V_n$  пузырьков, что позволяет визуализировать характер кипения ванны, т. е. наблюдать осцилляции «всплесков» на поверхности ванны. Количество и размер зародышей пузырьков на подине также может задаваться законом распределения или генератором случайных процессов. Слияние мелких пузырьков в более крупные происходит при их сближении (в смысле совпадения геометрических координат).

Такое сочетание математического и имитационного моделирования позволило получить достаточно хорошее (на качественном уровне) приближение механизма обезуглероживания к реальности. Одновременно с этим была создана достаточно хорошая наглядность. Эта модель вошла в состав создаваемого на кафедре ИТМ сетевого электронного лабораторного практикума.

На рис. 1 и рис. 2 представлены два момента состояния процесса программной реализации модели: в начале чистого кипения и при самораскипании ванны за счет механизма положительной обратной связи по перемешиванию.

Интересной особенностью модели является возможность ее использования в качестве объекта исследования, что позволяет реализовать проблемный подход к обучению и ее дальнейшее совершенствование.

Важно подчеркнуть, что эта модель одновременно явилась конкретной и очень наглядной реализацией одной из фундаментальных идей теории самоорганизации, основой механизма которой является увеличение дисперсии, рост, объединение и корреляция флуктуаций в зависимости от степени отклонения системы от термодинамического равновесия.

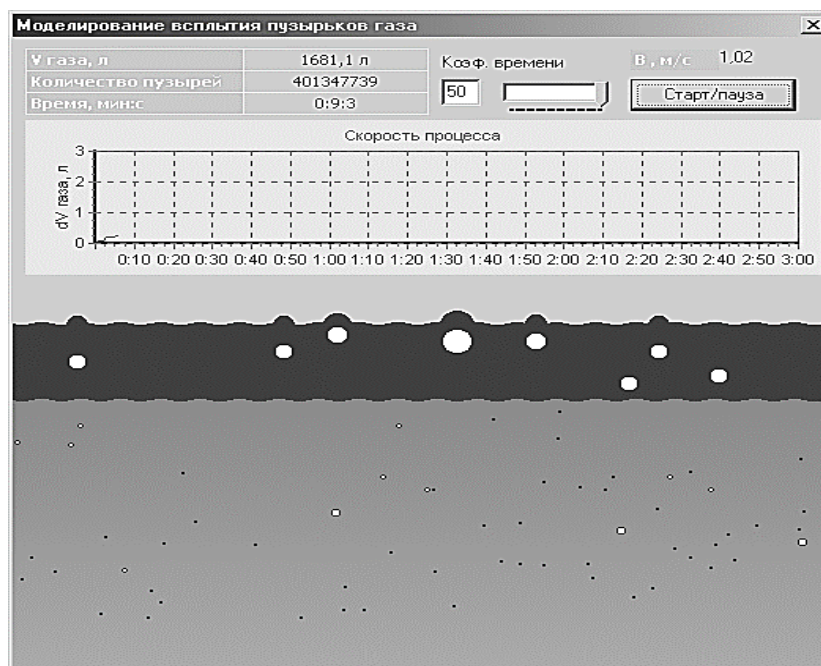


Рис. 1. Состояние ванны в начале чистого кипения

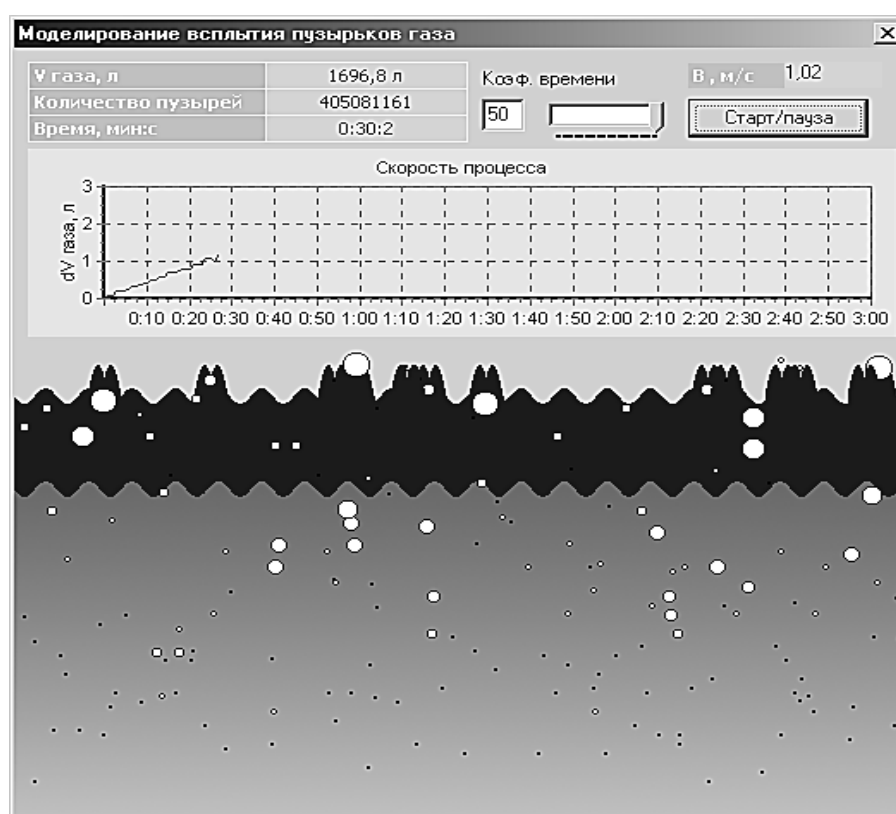


Рис. 2. Момент самораскипания ванны

### Список использованных источников

Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, Калашников С. Н. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 298 с.